 ISBN 5-7890-0363-X

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 539.3

А.А. БЫЧКОВ, А.Н. СОЛОВЬЕВ, А.В. ФОМИН,
О.Д. ПАХАНЬЯН, С.Н. ШЕВЦОВ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРКОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ МЕТОДИК. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ

В работе представлены результаты конечноэлементного численного анализа статического деформирования полимеркомпозитных образцов, применяемых в стандарте ASTM D5379-93 при определении их упругих характеристик. Предложена новая схема эксперимента и проведен численный анализ точности определения модулей сдвига в ортотропных композитах.
***Ключевые слова**: полимеркомпозит, упругие константы, МКЭ, эксперимент*

Введение. Рациональное конструирование, разработка технологий изготовления крупногабаритных несущих конструкций из композиционных материалов, армированных стекло- или углеволокном, требуют наличия надежных экспериментальных методик определения всех упругих постоянных для обеспечения требуемого динамического состояния таких конструкций в процессе эксплуатации. К их числу относятся несущие панели, лонжероны и т.п. Определение сдвиговых модулей наиболее часто применяемого ортотропного композиционного материала вызывает значительные экспериментальные трудности [1, 2], что объясняется, с одной стороны, сложностью создания и регистрации параметров напряженно-деформированного состояния чистого сдвига, а с другой, - тем, что конфигурация испытуемого готового изделия часто не позволяет вырезать образцы желаемой формы и размеров. В ряду известных методов, среди которых трехточечный изгиб [3], использование поверхностных акустических волн [4], наноиндентирование [5], аналитические и конечноэлементные методы, основанные на микромеханическом [6] и континуальном [7,8] описании композита, прямым и наиболее надежным является принятый в стандарте ASTM D5379-93 метод Иосипеску [1] - испытание на сдвиг призматических образцов – пластин (76×20 мм) толщиной 4…6 мм с двумя V-образными вырезами (рис.1).

При вертикальном перемещении траверсы испытательной машины со скоростью 100…1000 $\mu\varepsilon$/с в зоне образца, расположенной между вырезами, должен реализовываться чистый сдвиг, деформация которого (порядка 1000…3000 $\mu\varepsilon$ [9]) определяется тензометрированием. С использованием измеренных сдвиговых деформаций и сил, регистрируемых дина-

мометром испытательной машины, производится вычисление модуля сдвига в плоскости образца. Однако, как было показано в работах [10, 11], размеры и форма области, в которой реализуется чистый сдвиг, чрезвычайно чувствительны к ориентации волокон композита, конструктивному исполнению нагружающих элементов и точности изготовления образцов. Так, использованное в работе [12 и др.] грубое приближение, неправомерно расширяющее зону чистого сдвига на всю область образца между вырезами, может приводить к погрешностям в определении модуля сдвига до 50%.

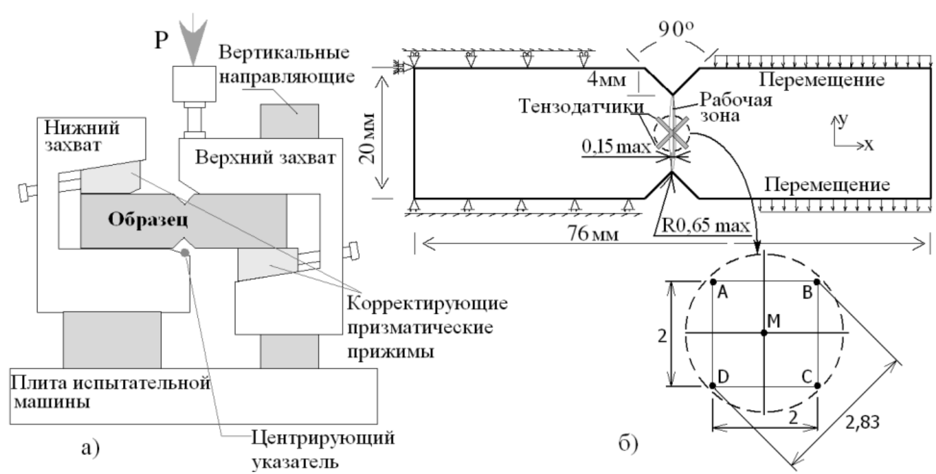


Рис.1. Схема (а) и образец (б) для испытания на сдвиг (ASTM D5379-93)

Другой источник погрешностей является исключительно инструментальным. Нагружение образца вертикальной силой **P** приводит к возникновению нежелательной боковой реакции в направлении оси ***x***, воспринимаемой либо направляющими самой испытательной машины (что, как правило, недопустимо), либо специально изготовленными направляющими, предназначенными для компенсации боковой реакции. Возникающая при этом в направляющих сила трения, зависящая от их исполнения, ориентации волокон и степени деформации образца, искажает показания встроенного в машину динамометра и, как следствие, результаты измерения модуля сдвига.

Для исключения влияния боковой реакции на точность измерений предложена новая схема испытания. Для стандартной и модернизированной схем выполнен сопоставительный анализ напряженно-деформированного состояния материала в рабочей зоне образца, позволивший определить размеры зоны чистого сдвига, реализующейся при различных ориентациях армирующих волокон и геометрических погрешностях изготовления, и оценить погрешность определения модуля сдвига, вызванную усреднением сдвиговых напряжений по рабочему сечению образца. В связи с тем, что для корректного расчета методом конечных элементов (МКЭ) необходима информация обо всех упругих модулях испытуемого композита,

в том числе и о том, который получается в результате такого расчета, предложена итерационная схема уточнения значений модулей сдвига на основе независимых экспериментальных данных.

Испытание на сдвиг плоского образца с V-образными надрезами. Пусть пластинка из упругого ортотропного композита подвержена плоским напряжениям и пусть оси ***x-z*** направлены точно вдоль (или поперек) оси армирования. При испытании образца в плоском напряженном состоянии, когда в направлении **y** деформация не стеснена, возможно определение всего четырех независимых упругих констант из девяти: $E_x, E_z, G_{xz}, \nu_{xz}$.

Из работы [1] следует, что при деформации чистого сдвига, которая должна быть реализована в зоне между разрезами образца, испытуемого по схеме рис.1, модуль сдвига определяется только величиной деформации γ_{xz} и создающими ее касательными напряжениями τ_{xz}. Однако в эксперименте по показаниям датчиков в направлениях ±45^0 (на рис.1,б расположение тензорозетки отмечено крестиком) определяется не деформация γ_{xz} в точке М, а средняя сдвиговая деформация в рабочей зоне образца:

$$\bar{\gamma} = \varepsilon_{45^0} - \varepsilon_{-45^0} \, . \qquad (1)$$

Из вычисленного значения деформации и среднего приложенного напряжения сдвига $\bar{\tau} \equiv P/A$ (отношение приложенной силы к площади сечения рабочей области между разрезами) вычисляется эффективный модуль сдвига в плоскости ***xz***:

$$\overline{G}_{xz} = \bar{\tau}/\bar{\gamma} \, . \qquad (2)$$

Так как $\bar{\tau}$ не является точным значением напряжения в области, где размещены датчики, для определения касательных напряжений $\tau^0 \equiv \tau_{xz}$ в зоне чистого сдвига найденный эффективный модуль должен быть умножен на корректирующий коэффициент С:

$$G_{xz} = C\overline{G}_{xz} \, , \qquad (3)$$

равный

$$C = \tau^0 \Big/ \bar{\tau} = \frac{1}{V_0 \bar{\tau}} \int_{V_0} \tau dV \, , \qquad (4)$$

где интегрирование распространяется на объем V_0 под площадкой, покрываемой датчиками (см. рис.1,б). Очевидно, корректирующий множитель может быть получен только на основе конечноэлементного анализа напряженно-деформированного состояния образца в окрестности зоны наклейки датчиков. Для такого анализа необходимо располагать значениями всех упругих модулей, в том числе и исследуемого модуля сдвига. Эти модули получают либо экспериментально с использованием данных независимых

испытаний на растяжение – сжатие [12], изгиб или кручение по трехточечным схемам, либо, используя ту или иную аналитическую методику [6…8].

Конечноэлементный анализ напряженно-деформированного состояния образца стандартной методики.

Рассматривается статическая задача теории упругости [13] для применяемого в стандартной методике образца с V – образными вырезами (см. рис.1,б) в рамках плосконапряженного состояния (плоскость ***xz***). В качестве материала образца использовали:

I - эбонит (изотропный в плоскости ***xz***) - модуль Юнга E=2.88 ГПа, коэффициент Пуассона v=0.41;

II - «композит 1» - жесткость в направлении оси ***x*** в два раза больше жесткости в направлении оси ***z*** (табл.1);

III - «композит 3» - жесткость в направлении оси ***x*** в два раз меньше жесткости в направлении оси ***z*** (табл.1);

Таблица 1

Элементы матрицы жесткости материалов, использованных в конечноэлементном анализе

Материал образца	$c_{11}=c_{22}$	c_{33}	c_{12}	c_{13}	c_{23}	$c_{44}=c_{55}$	c_{66}
	ГПа						
I - эбонит	6.7	6.7	4.65	4.65	4.65	1.02	1.02
II – композит 1	13.4	6.7	4.65	4.65	4.65	1.02	5.37
III – композит 3	6.7	13.4	4.65	4.65	4.65	4.0	1.02

Примечание. Правило соответствия индексов:

$1 \leftrightarrow x;\ 2 \leftrightarrow y;\ 3 \leftrightarrow z;\quad 44 \leftrightarrow yz;\quad 55 \leftrightarrow zx;\ 66 \leftrightarrow xy$

Расчеты проводились в конечноэлементном комплексе ACELAN [15, 16], с использованием технологии параллельных вычислений. В соответствии с рис.1,б в конечноэлементной сетке модели были выделены пять узлов: центральная точка M(x_m, y_m), ($x_m = 38{,}0;\ y_m = 10{,}0$) и точки A(37.0,11.0), B(39.0,11.0), C(39.0,9.0) и D(37.0,9.0). В точке M вычислялись напряжения, в частности σ_{xz}, которое принималось в качестве $\bar{\tau}$ в соотношении (2). По смещениям точек A, B, C, D определяли относительные удлинения отрезков AC и BD, через которые вычислялась величина $\bar{\gamma}$ по соотношению (1). Таким образом, в численных экспериментах моделировалось измерение относительных деформаций тензодатчиками с базой 2,83 мм (отрезки AC и BD). В качестве точного модуля выбиралось его значение из табл.1.

В первой серии численных экспериментов исследовали напряженное состояние в рабочей зоне образцов и погрешность определения модуля сдвига при различной степени анизотропии материала. На горизонтальных гранях образцов были заданы кинематические граничные условия

ISBN 5-7890-0363-X

(правая половина жестко закреплена, на левой – заданы нулевые горизонтальные и постоянные вертикальные смещения).

Пример 1.

В первом численном эксперименте (материал I) изучались распределения смещений u_x, u_z и напряжений $\sigma_{xx}, \sigma_{zz}, \sigma_{xz}$. В табл. 2 представлены найденные по МКЭ напряжения $\sigma_{xx}, \sigma_{zz}, \sigma_{xz}$ в центральной точке М(x_m, y_m) образца; $\tilde{c}_{55}$ - вычисленное по формуле (2) при $\bar{\tau} = \sigma_{xz}(x_m, y_m)$ значение модуля сдвига c_{55} и относительная погрешность (в процентах) его определения

$$\delta = |\tilde{c}_{55} - c_{55}| / c_{55} \times 100\%. \quad (5)$$

Как видно из табл.2, растягивающие напряжения в точке М на три порядка меньше сдвигающих, т.е. в центре образца реализуется состояние «чистого» сдвига.

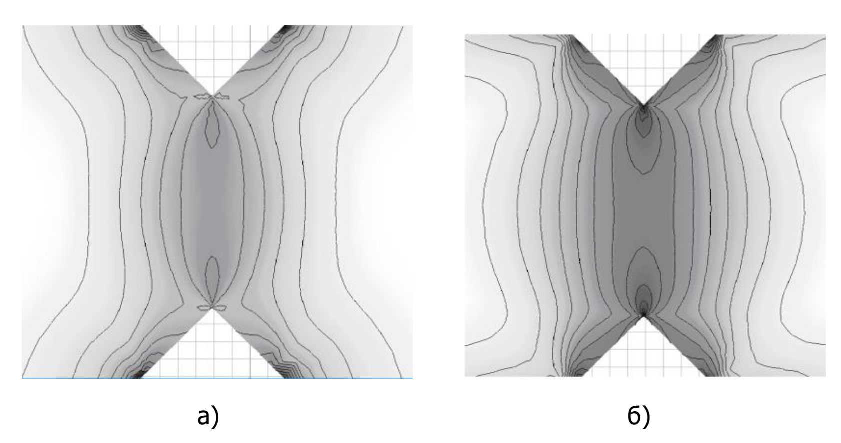
Таблица 2

Напряжения в центральной точке образца и модуль сдвига (*пример 1*)

Материал	σ_{xx}, Па	σ_{zz}, Па	σ_{xz}, Па	$\tilde{c}_{55}$, Па	δ,%
I – эбонит	-0.440×10^3	0.200×10^4	-0.830×10^7	1.027×10^9	0.6

Примеры 2,3.

В следующих двух экспериментах краевые условия и методика расчета соответствовали примеру 1. В качестве материала выбирались «композит 3» и «композит 1». Результаты расчетов аналогичны предыдущим и представлены на рис.2 и в табл.3. Картина распределения напряжений σ_{xz} образцов показывает, что размеры области между разрезами, где реализуется «чистый» сдвиг, составляют $\Delta x \times \Delta z \sim 4 \times 5$ мм, это и есть максимальный размер базы для установки тензорозеток.



а) б)

Рис.2. Распределение сдвиговых напряжений σ_{xz} в образцах из анизотропных материалов: а - «композит 3»; б - «композит 1»

Таблица 3

Напряжения в центральной точке образца и модуль сдвига (*примеры 2,3*)

Материал	σ_{xx}, Па	σ_{zz}, Па	σ_{xz}, Па	$\tilde{c}_{55}$, Па	δ, %
Композит 3	-0.348×10^4	0.140×10^5	-0.288×10^8	4.041×10^9	1.0
Композит 1	-0. 351×10^3	0.401×10^4	-0.918×10^7	1.027×10^9	0.6

Данные табл.2,3 показывают, что для изотропных и анизотропных тел с рассмотренной степенью анизотропии в отсутствие погрешностей формы и закрепления образцов при точном определении напряжений в центральной точке модуль упругости c_{55} определяется с погрешностью, не превышающей 1%. Эта погрешность обусловлена только усреднением сдвиговых деформаций по квадратной площадке в рабочей зоне образца, покрываемой тензорозеткой. Такая точность является предельно достижимой в рамках стандартной методики, требующей кроме выполнения перечисленных условий наличия надежной априорной информации обо всех (см. табл.1) упругих константах материала. Грубое приближение (2) равномерности распределения сдвиговых напряжений в рабочей зоне образцов должно обязательно приниматься во внимание при интерпретации данных, получаемых в эксперименте.

Модифицированная схема. Испытание плоского образца с четырьмя V-образными надрезами. Для устранения недостатков схемы испытания, представленной на рис.1, были разработаны специальная форма образцов и оснащение для их симметричного нагружения, исключающие появление боковых усилий и, следовательно, необходимость использования дополнительных направляющих на прецизионных испытательных машинах для растяжения (рис.3).

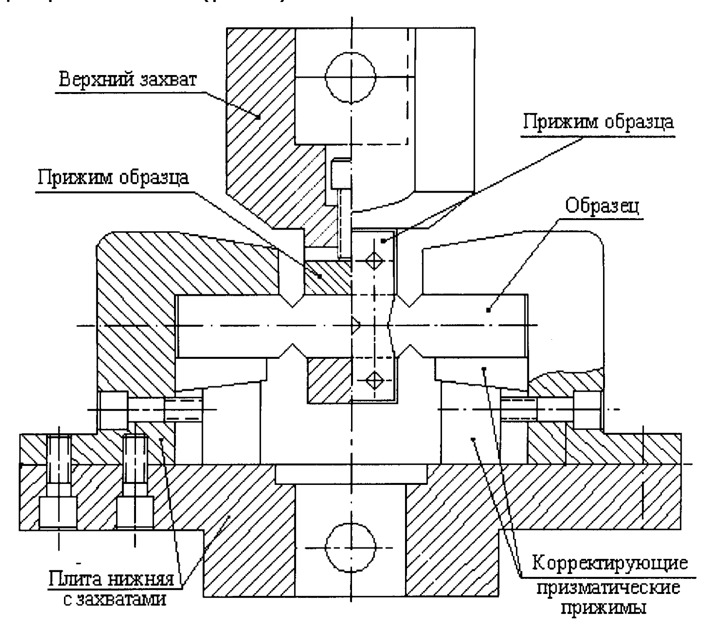
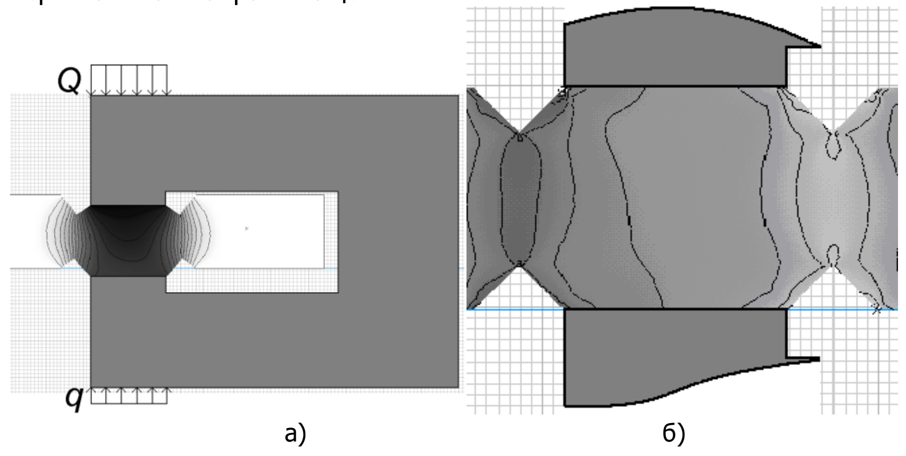


Рис.3. Устройство симметричного нагружения образцов с четырьмя V-образными надрезами при определении модуля сдвига на испытательной машине для растяжения

В следующих численных экспериментах рассматривалась схема нагружения, отличная от идеальных кинематических краевых условий, принятых в предыдущих примерах. Захват средней части образца моделировался жестким контактом со стальной обоймой (рис.4,а), осуществляющей предварительное сжатие. К верхней грани средней части образца со стороны обоймы приложены сжимающие напряжения Q=1.0×10^5 Па, к ее нижней части - напряжения q=1.0×10^2 Па. Остальные горизонтальные поверхности образца неподвижны. Обойма могла двигаться без трения вдоль вертикальной направляющей.



а) б)

Рис.4. Распределение смещений u_z (а) и напряжений σ_{xz} (б) в симметричном образце с четырьмя V – образными вырезами при испытании на сдвиг материала I - эбонит

Все описанные ниже примеры моделировали условия реальных экспериментов; в них дополнительно определялось среднее напряжение сдвига, равное отношению приложенной силы к поперечному сечению между вырезами, и поправочный коэффициент C (4).

Пример 4.

Для случая, когда в качестве материала образца был выбран эбонит, на рис.4 представлены распределения смещений u_z и напряжений сдвига σ_{xz}, а в табл. 4 - результаты, аналогичные приведенным в табл.2. Среднее напряжение, вычисленное по формуле $\bar{\tau} \equiv P/A$=0.833×10^7Па, приводит к завышенному на 11% значению модуля $\tilde{c}_{55}$ =1.156×10^9 Па и поправочному коэффициенту *C*=0.889.

Таблица 4

Напряжения в центральной точке образца и модуль сдвига (*пример 4*)

Материал	σ_{xx}, Па	σ_{zz}, Па	σ_{xz}, Па	$\tilde{c}_{55}$, Па	δ,%
I-эбонит	-0. 479×10^6	-0.893×10^6	-0.741×10^7	1.028×10^9	0.7

Примеры 5, 6.

Постановка задач полностью соответствовала *примеру 4*, но в качестве материала выбирались «композит 3» и «композит 1». Результаты моделирования представлены в табл.5. Картины распределения напряжений качественно совпадают с полученными в *примерах 2,3* (см. рис.2).

Таблица 5

Напряжения в центральной точке образца и модуль сдвига (*примеры 5, 6*)

Материал	σ_{xx}, Па	σ_{zz}, Па	σ_{xz}, Па	$\tilde{c}_{55}$, Па	δ, %
Композит 3	-0.336×10^6	-0.102×10^7	-0.804×10^7	4.04×10^9	1.0
Композит 1	-0.484×10^3	-0.768×10^4	-0.735×10^7	1.028×10^9	0.7

Вычисление среднего напряжения по формуле (2) $\bar{\tau}$ =0.833×10^{7}Н/м^2 приводит для материала «композит 3» к завышенному на 5% значению модуля $\tilde{c}_{55}$=4.193 ГПа, поправочному коэффициенту *C*=0.964, а для материала «композит 1» - к завышенному на 14% значению модуля $\tilde{c}_{55}$=1.166 ГПа и поправочному коэффициенту *C*=0.882.

Результаты КЭ моделирования испытаний на сдвиг образцов симметричной конструкции в отсутствие погрешностей формы и закрепления (*примеры 4-6*) показали полное соответствие напряженно-деформированного состояния со стандартной схемой испытаний (*примеры 1-3*). Поэтому приводимые ниже результаты исследования влияния геометрических погрешностей формы и крепления образцов относятся в равной мере к стандартной и модифицированной схемам.

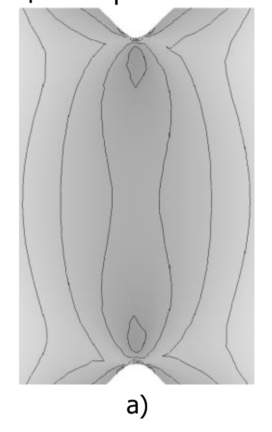
Дополнительно установлено, что даже для образцов без погрешностей формы применение грубого соотношения (2) приводит к существенному росту (до 15%) ошибки определения сдвигового модуля c_{55} и для получения более точного результата требует дополнительного определения σ_{xz} в центральной точке М с использованием МКЭ.

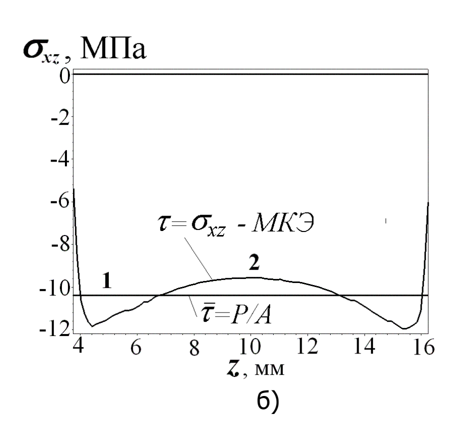
Влияние погрешностей формы и закрепления образцов. При проведении следующей группы численных экспериментов имели цель установить влияние погрешностей выполнения геометрии образцов и способа их установки в испытательное приспособление на точность определения модуля c_{55}.

Пример 7.

Как видно на рис.2 и 4,б, распределение напряжения σ_{xz} в плоскости, проведенной через вершины вырезов, значительно отличается от равномерного, что приводит к расхождению между средним значением $\bar{\tau}$, вычисляемым по формуле $\bar{\tau} \equiv P/A$, и напряжением $\sigma_{xz}(x_m, y_m)$ в точке М, полученным КЭ моделированием. Очевидно также, что это расхождение будет зависеть от скругления вершины выреза радиусом, обусловленным конструкцией инструмента для изготовления образцов (см. рис.1,б). Поэтому в численном эксперименте (материал I, краевые условия *примера 1*)

определяли оценку коэффициента *C* в соотношении (4) и погрешность модуля сдвига для образца, у которого вершина выреза сглажена дугой окружности радиусом 0.7 мм. Наличие сглаживающей окружности (рис.5) снижает неравномерность касательных напряжений по высоте сечения (наличие угла приводит в математической модели к сингулярным напряжениям в его вершине), однако, как видно из рис.5, неравномерность и концентрация напряжений в этом сечении не исчезает.





а) б)

Рис.5. Результаты МКЭ расчета напряжения σ_{xz} в образце со сглаженными вырезами: а – внутри рабочей области образца; б – по высоте поперечного сечения; 1 – расчет по формуле (2); 2 – расчет МКЭ

Напряжение в центре образца составляет $\sigma_{xz}(x_m, y_m)$=-0.956×10^{7}Па, при этом его среднее значение, определяемое по формуле (4) $\bar{\tau}$ =1.040×10^{7}Па, что приводит к завышенному значению модуля (погрешность δ =8.8%; *C*=0.919).

Пример 8.

В конструкции изображенного на рис.1 стандартного образца для испытаний допускается взаимное смещение вершин вырезов вдоль оси $\boldsymbol{x}$ до 0.15 мм. Из-за того, что технологически выдержать такую точность достаточно сложно, в данном примере вершина верхнего выреза была смещена относительно вершины нижнего на 0,5 мм. Остальные условия численного эксперимента полностью соответствовали *примеру 4*.

Таблица 6

Напряжения в центральной точке образца и модуль сдвига (*пример 8*)

Материал	σ_{xx}, Па	σ_{zz}, Па	σ_{xz}, Па	$\tilde{c}_{55}$, Па	δ,%
I-эбонит	-0. 613×10^6	-0.231×10^6	-0.737×10^7	1.033×10^9	1.3

Сопоставление табл.4 и табл.6 показывает, что предельно достижимая погрешность увеличилась незначительно: с 0.7% до 1.3%. Среднее напряжение, вычисленное по формуле $\bar{\tau} \equiv P/A$=0.833×10^7 Па, приводит к

завышенному на 11% значению модуля $\tilde{c}_{55}$ =1.156 ГПа и поправочному коэффициенту *C*=0.889.

Результаты *примеров 7,8* показывают, что всегда имеющие место при изготовлении образца допустимые стандартом [1] скругление при вершине V-образного выреза и взаимное смещение вершин их углов не увеличивает существенно погрешность в определении модуля сдвига. Такие погрешности формы ухудшают теоретически достижимую точность с 0.7% до 1.0…1.3%, в то время как ошибка, обусловленная использованием усредненных по сечению образца напряжений сдвига, практически не зависит от вариации формы образцов в пределах разрешенных допусков.

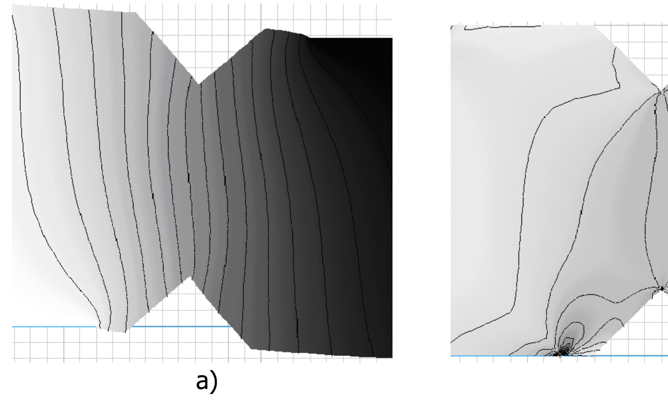
Пример 9.

В приборе [1] в окрестности V-образных вырезов имеются свободные участки горизонтальных граней (см. рис.1,б). Результаты соответствующего численного эксперимента показали, что напряженное состояние в рабочей зоне весьма чувствительно к длине свободных участков граней образца. Из рис.6 и данных табл.7 следует, что напряженное состояние в рабочей зоне значительно отличается от состояния «чистого» сдвига, тем не менее, погрешность в определении модуля c_{55} по формуле (3), использующей $\bar{\tau} = \sigma_{xz}(x_m, y_m)$, незначительна.

Таблица 7

Напряжения в центральной точке образца и модуль сдвига (*пример 9*)

Материал	σ_{xx}, Па	σ_{zz}, Па	σ_{xz}, Па	$\tilde{c}_{55}$, Па	δ,%
I-эбонит	-0.114×10^7	-0.234×10^7	-0.473×10^7	1.027 ГПа	0.6



а) б)

Рис.6. Распределения смещений: u_z (а) и сдвиговых напряжений σ_{xz} (б) в образце с частично свободными горизонтальными гранями

Суммируя результаты трех описанных опытов, следует признать, что инструментальные погрешности, обусловленные допускаемыми стандартом [1] отклонениями геометрии образцов и неидеальностью их крепления, на порядок меньше, чем погрешности метода в результате исполь-

зования для расчета сдвигового модуля c_{55} грубого приближения $\bar{\tau} \equiv P/A$. Из этого следует вывод о необходимости дополняющего физический эксперимент численного определения напряжений сдвига в центральной точке образца даже при обеспечении идеальных условий испытания.

Итерационная схема уточнения модуля c_{55}. В условиях реального эксперимента, когда присутствуют рассмотренные выше геометрические погрешности формы и закрепления образцов, но остальные модули определены предварительно с помощью экспериментов, независимых от рассматриваемых испытаний, может быть предложена итерационная схема уточнения и определения интервала значений модулей сдвига на основе численного эксперимента в рамках МКЭ. Исходными данными для запуска итерационного процесса являются P - сдвигающее усилие и $\gamma_{\exp}$ - измеренная деформация сдвига, которые позволяют определить $\tilde{c}_{55}$ из соотношения (2). Далее процесс использует результаты МКЭ моделирования по следующей схеме:

0. $i = 0$, $c_{55}^{(0)} = \tilde{c}_{55}$ $\rightarrow$ МКЭ $\rightarrow$ $\tau^{(0)} = \sigma_{xz}(x_m, y_m)$;

1. $i = 1$, $c_{55}^{(1)} = \tau^{(0)} / \gamma_{\exp}$ $\rightarrow$ МКЭ $\rightarrow$ $\tau^{(1)} = \sigma_{xz}(x_m, y_m)$;

2. $i = 2$, $c_{55}^{(2)} = \tau^{(1)} / \gamma_{\exp}$ $\rightarrow$ МКЭ $\rightarrow$ $\tau^{(2)} = \sigma_{xz}(x_m, y_m)$

и т.д.

Расчеты, проведенные по предложенной схеме для материала «композит 1» (в качестве точного значения модуля было взято его значение из табл.5, в качестве $\gamma_{\exp}$ - соответствующая деформация, определенная МКЭ по формуле (2)), показали быструю сходимость итерационного процесса:

$$c_{55}^{(0)} = \tilde{c}_{55} = 1.166 \text{ ГПа}, \; c_{55}^{(1)} = 1.019 \text{ ГПа}, \; c_{55}^{(2)} = 1.0275 \text{ ГПа},$$

что отличается от принятого за точное значение менее чем на 0.05%.

Аналогичная схема может быть эффективно использована в отсутствие точной информации о характере геометрических отклонений рабочей части образцов. Варьируя величину этих отклонений в пределах поля допуска на изготовление, можно с использованием только компьютерного моделирования построить поле рассеяния и доверительный интервал для исследуемого модуля сдвига по результатам одного испытания.

Выводы. Для определения модуля сдвига ортотропных композитов предложены модифицированная схема испытания и специальная форма плоского образца с четырьмя V-образными надрезами, исключающие появление боковых усилий и дополнительных сил трения, искажающих показания динамометра испытательной машины. Результаты конечноэлементного моделирования испытаний на сдвиг образцов симметричной конструкции в отсутствие погрешностей формы и закрепления показали полное соответ-

ствие их напряженно-деформированного состояния со стандартной схемой испытаний.

При точном определении напряжений в центральной точке образцов и отсутствии погрешностей их формы и закрепления ошибка в определении модуля упругости C_{55} обусловлена только усреднением сдвиговых деформаций по квадратной площадке в рабочей зоне образца, покрываемой тензорозеткой. Для изотропных и анизотропных тел с рассмотренной степенью анизотропии эта ошибка является предельно достижимой и не превышает 1%.

Усреднение неоднородных сдвиговых напряжений по рабочему сечению образцов даже идеальной формы приводит к росту до 15% ошибки в определении сдвигового модуля c_{55}. Для получения более точного результата необходимо дополнительное определение σ_{xz} в центральной точке М с использованием метода конечных элементов.

Допустимые стандартом ASTM D5379-93 отклонения формы образцов от идеальной (скругление при вершине V-образного выреза до 0,625 мм и взаимное смещение вершин углов вырезов до 0,5 мм не ухудшают существенно теоретически достижимую точность определения модуля сдвига (с 0.7 до 1.0…1.3%). Такие погрешности формы приводят к ошибке, на порядок меньше ошибок, обусловленных использованием усредненных по сечению образца напряжений сдвига.

Предложена эффективная итерационная схема уточнения и определения интервала значений модулей сдвига на основе численного эксперимента в рамках МКЭ. Схема использует результаты испытания (измеренные сдвигающее усилие, деформация сдвига, размеры сечения образца) и значения остальных упругих модулей, определенных предварительно с помощью экспериментов, независимых от рассматриваемых испытаний, только для нахождения нулевого приближения. Для композитов, у которых жесткости на растяжение отличаются не более чем в два раза, итерационный процесс продемонстрировал быструю сходимость – уже после трех итераций вычисленное значение модуля сдвига уклоняется от принятого за точное значение менее чем на 0.05%.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 03-07-90411, 05-01-00734, 05-01-00690) и государственного контракта ФЦНТП 02.442.11.7240.

Библиографический список

1.Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-notched Beam Method, ASTM D5379-93, American Society for Testing and Materials, Philadelphia. (May 1993)

2.Tomblin J.S., Yeow C.N., Suresh K.R. Material Qualification and Equivalency for Polymer Matrix Composite Material Systems//U.S. Department of Transportation; Federal Aviation Administration. Final Report, DOT/FAA/AR-00/47, April 2001, 108 p.

3. Fereshteh-Saniee F., Majzoobi G.H., Bahrami M. An experimental study on the behavior of glass–epoxy composite at low strain rates//Journal of Materials Processing Technology. – 2005.-No.162–163.- p.39–45

4. Hurley D.C., Tewary V.K., Richards A.J. Surface acoustic wave methods to determine the anisotropic elastic properties of thin films//MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY. – 2001.- No.12.- p.1486–1494

5. Barthelat F., Espinosa H.D. ELASTIC PROPERTIES OF NACRE ARAGONITE TABLETS//Proceedings of the 2003 SEM Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics, June 2-4.- Charlotte, North Carolina.- Session 68.- Paper 187.- 2003.- p.6.

6. Buryan O.K., Novikov V.U. MODELING OF THE INTERPHASE OF POLYMER-MATRIX COMPOSITES: DETERMINATION OF ITS STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES//Mechanics of Composite Materials.- 2002.- Vol. 38, No. 3.- p.187-198

7. Kriz R.D., Farkas D., Batra R.C., Levensalor R.T., Parikh S.D. Combined Research and Curriculum Development of Web-based Educational Modules on Mechanical Behavior of Materials//Journal of Materials Education.- 2002.-Vol. 24 (1-3) - p. 41-52

8. Фудзии Т., Дзако М. Механика разрушения композиционных материалов/М.: Мир, 1982, 232 с.

9. Masters J. E., Portanova M. A. Standard Test Methods for Textile Composites//NASA Contractors Report 4751.- Lockheed Martin Engineering &Sciences Company.-82 p.

10. Jianmey He, Martin Y.M. Chiang et al. Application of the V-Notch Shear Test for Unidirectional Hybrid Composites//Journal of Composite Materials.-2002.- Vol. 36.- No. 23.- p.2653-2666

11. Neumeister J. M., Melin L.N. EXPERIMENTAL DETERMINATION OF IN-PLANE SHEAR PROPERTIES OF ANISOTROPIC COMPOSITE PANELS//J.Dept. of Solid Mechanics, KTH – Royal Institute of Technology.- 2003.-SE – 100 44.- Stockholm.- 8 p.

12. Ozes C., Demirsoy M. Stress analysis of pin-loaded woven-glass fiber reinforced epoxy laminate conveying chain components//Composite Structures. – 2005.-Vol. 69.- p.470–481

13. Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. ASTM D3039-95.- American Society for Testing and Materials, Philadelphia. (June 1995)

14. Новацкий В. Теория упругости/ М.:Мир, 1975.- 750 с.

15. Белоконь А.В., Наседкин А.В., Соловьев А.Н. Новые схемы конечно-элементного динамического анализа пьезоэлектрических устройств// ПММ 2002. - Т. 66.- № 3.- с. 491-501

16. Белоконь А.В., Бычков А.А., Васильченко К.Е., Надолин Д.К., Наседкин А.В., Соловьев А.Н. Разработка кластерной версии КЭ комплекса ACELAN// Параллельные вычисления в задачах математической физики. Сборник трудов всероссийской научно-технической конференции, 21-25 июня 2004, г. Ростов-на-Дону, изд-во РГУ.- 2004.- с. 24-35

Материал поступил в редакцию 26.01.06.

A.A.BYCHKOV, A.N.SOLOVIEV, A.V.FOMIN,
O.D.PAHANYAN, S.N.SHEVTSOV

POLYMERIC COMPOSITE ELASTIC CONSTANTS DETERMINATION ON THE BASIS OF MODIFIED TECHNIQUE. THEORETICAL & NUMERICAL ANALYSIS

The V-notch (standard ASTM D5379-93) shear test was investigated for determining the in-plane shear modulus. With purpose of lateral response exception the new scheme of test with specimen symmetrical loading is offered. For standard and modified schemes the comparative finite element analysis of state in a specimen's working area is executed. This analysis allow to determine the shape and sizes of a pure shear zone at different orientations of reinforcing fibers and geometrical tolerances, and to estimate error in determination of a shear modulus stipulated by averaging of shear stresses in specimen's working section. The results have shown full coincidence of stress-strained states at standard and modified schemes of tests. Our numerical evaluation shows that even for specimens with ideal shape using of mean shearing stress (relation of an applied force to a sectional area between notches) always increase error of shear module determination more than 15 % and for obtaining more precise results it is necessary to padding definition of shear stresses in center of a working area with FEM analysis. For using in actual experiment, when there are geometrical errors of the shape and fastening of specimens, but the remaining modules are determined irrespective of considered tests, the effective iterative scheme on the FEM based numerical experiment for refinement and for definition of a shear modulus values confidence interval is offered.

БЫЧКОВ Антон Алексеевич (р. 1982), в 2004 году окончил Ростовский государственный университет по специальности «Прикладная математика», аспирант каф. «Математическое моделирование» РГУ.
Автор 5 публикаций.

СОЛОВЬЕВ Аркадий Николаевич (р.1954), к.ф.-м.н., доцент, в 1977 году окончил Ростовский государственный университет по специальности «Механика», доцент кафедры «Теоретическая механика» ДГТУ и кафедры «Математическое моделирование» РГУ.
Автор более 100 научных работ.

ФОМИН Александр Валериевич (р. 1980), в 2003 году окончил Донской государственный технический университет по специальности «Стандартизация и сертификация», аспирант кафедры «Авиастроение» ДГТУ.
Автор 7 публикаций.

ПАХАНЬЯН Ольга Давидовна, студентка ДГТУ, обучается на кафедре «Стандартизация и сертификация», автор 3 публикаций, лауреат Всероссийского конкурса студентов и аспирантов «Компьютерный инжиниринг».

ШЕВЦОВ Сергей Николаевич (р. 1949), в 1974 году окончил Ростовский государственный университет по специальности «Физика», заведующий лабораторией «Машиностроение и высокие технологии» Южного центра РАН, доктор технических наук (2001), профессор кафедры «Авиастроение» ДГТУ, дважды лауреат премии им. М.В.Нагибина.
Автор более 120 научных работ.